

Обзорная статья

УДК 66.011; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-3-27-34

ОБЗОР МЕТОДОВ РАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕ ПОЖАРА

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Пермяков Алексей Александрович;

Романов Николай Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Установлено, что оценка состояния бетонных конструкций является важнейшим аспектом современной строительной инженерии, а диагностика бетонных конструкций на месте пожара необходима для принятия обоснованных решений о возможности ведения спасательных и неотложных аварийно-восстановительных работ, организации следственных действий и других мероприятий. Констатируется, что для того, чтобы устранить эти ограничения, более распространенной альтернативной стратегией является сочетание прямых испытаний на сжатие с передовыми методами неразрушающего контроля, такой подход позволяет более эффективно и точно оценивать качество конструкционного материала без необходимости в обширном отборе проб и проведении разрушающих испытаний. Проанализированы основные методы неразрушающего контроля: акустические, оптические, электромагнитные, тепловые и рентгенографические. Поставлена задача – выработка объективных критериев выбора методов неразрушающего контроля для оценки состояния бетонных конструкций после пожара.

Ключевые слова: пожар, бетон, бетонная конструкция, неразрушающий контроль, методы неразрушающего контроля

Для цитирования: Кузьмин А.А., Пермяков А.А., Романов Н.Н. Обзор методов разрушающего контроля состояния бетонных конструкций после пожара // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2025. № 3. С. 27–34. DOI: 10.61260/2304-0130-2025-3-27-34.

Введение

Оценка состояния бетонных конструкций является важнейшим аспектом современной строительной инженерии. Диагностика бетонных конструкций на месте пожара необходима для принятия обоснованных решений о возможности ведения спасательных и неотложных аварийно-восстановительных работ, организации следственных действий и других мероприятий. Традиционно качество бетона в гражданских сооружениях оценивается с использованием образцов бетонных цилиндров извлекаемых из конструкций, которые проверяются с помощью простых испытаний на сжатие, описанных в стандарте ASTM C39 [1].

Однако применение этого метода требует значительного количества образцов и последующего прямого измерения с помощью разрушающих испытаний, что может быть длительным, дорогостоящим и трудоемким процессом.

Чтобы устранить эти ограничения, более распространенной альтернативной стратегией является сочетание прямых испытаний на сжатие с передовыми методами неразрушающего контроля (англ. Non-Destructive Testing – NDT). Такой подход позволяет более эффективно и точно оценивать качество конструкционного материала без необходимости в обширном отборе проб и проведении разрушающих испытаний.

Неразрушающий контроль (NDT) относится к методам, используемым для исследования объектов, материалов или систем без ущерба для их использования в будущем. Это означает проверку или измерение без причинения какого-либо вреда [2]. Испытания, доступные для конструкций, варьируются от полностью неразрушающих, которые не наносят ущерба бетону, до тех, которые слегка повреждают поверхность, и частично разрушающих испытаний, таких, как испытания стержня и испытания на выдергивание, которые впоследствии требуют ремонта поверхности.

Методы неразрушающего контроля служат двум основным целям при диагностике бетонных конструкций [3, 4]:

- оценке механических свойств, прежде всего прочности и общего состояния конструкций [5–7];
- оценке безопасности и показателей стабильности, включая проверку таких факторов, как пористость, глубина карбонизации, содержание воды, наличие неоднородностей и слабые места [8–10].

Существуют различные методы неразрушающего контроля, основанные на различных принципах, которые можно разделить на методы: акустические, оптические, электромагнитные, тепловые и рентгенографические [11].

Согласно Форду и др. [12], при проведении неразрушающего контроля необходимо учитывать пять основных факторов: требуемую глубину проникновения, необходимое вертикальное и поперечное разрешение, контраст физических свойств объекта и его окружения, отношение сигнал/шум для этих физических свойств, а также наличие информации о технологических свойствах решенного объекта.

Выбор метода неразрушающего контроля зависит от нескольких факторов, включая требуемые параметры конструкции, осуществимость процедуры тестирования и наличие испытательного оборудования. Таким образом, методы неразрушающего контроля являются универсальными инструментами, используемыми для оценки целостности как новых, так и существующих и поврежденных конструкций.

Методы неразрушающего контроля дают ценную информацию, их точность и согласованность могут существенно различаться. На результаты могут влиять такие факторы, как качество оборудования, квалификация оператора и конкретные условия испытания материала конструкции.

Однако точность измерений при оценке состояния бетона может быть достигнута различными способами. Во-первых, необходимо убедиться, что оборудование для неразрушающего контроля должным образом откалибровано с использованием апробированных традиционных методов, чтобы свести к минимуму систематические ошибки, и сравнить методы неразрушающего контроля с методами разрушающего контроля, такими как отбор проб керна, чтобы установить корреляцию между результатами неразрушающего контроля и фактическими свойствами бетона [13, 14].

Другим способом достижения точности является сочетание нескольких методов неразрушающего контроля, таких как методы SonReb, сочетающие измерение скорости ультразвукового импульса с измерением прочности методом упругого отскока, и которые могут повысить точность за счет использования сильных сторон каждого метода [15–18]. Статистический анализ собранных данных, включая вычисление среднего значения, стандартного отклонения и доверительных интервалов, помогает достичь необходимой надежности и точности измерений. Кроме того, этому способствует использование искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения.

Цель данного обзора – дать всестороннее представление о различных методах, их принципах и способах применения, помочь выбрать наиболее подходящие методы путем определения сильных сторон и ограничений каждого метода для точной оценки новых, существующих и поврежденных в ходе пожара строительных конструкций из бетона.

Обзор литературных источников

В современной литературе описаны результаты многочисленных исследований свойств бетона с использованием методов механического неразрушающего контроля (NDT), которые подтвердили их эффективность в оценке свойств материала. Многие исследования, такие как работы Шариати и др. [19], Санчес и Тарранза [20], а также Каземи и др. [21] продемонстрировали эффективность испытания по методу Шмидта для оценки прочности на сжатие. Эти исследования подтверждают надежность результатов испытаний и простоту их использования в различных ситуациях для бетонных конструкций.

В работах Бренчича и др. [22, 23] и Баллы и др. [24, 25] было подробно рассмотрено применение метода Шмидта для оценки механических свойств конструкций, выполненных в виде каменной кладки. Эти исследования дают ценную информацию о механических свойствах подобных конструкций.

К другим измерительным процедурам, обеспечивающим целостность и долговечность бетонных конструкций, относятся испытания на растяжение и распиловку. Интересны результаты исследований, проведенных Фазли и др. [26], Рамосом и др. [27], а также Бональдо и др. [28], продемонстрировавшие эффективность испытаний на отрыв для оценки прочности межфазного соединения между бетоном и фибробетоном.

Результаты исследования Садовски и др. [29] подтвердили надежность этого метода для оценки механизма разрушения поверхности раздела ремонтного раствора и каменной кладки. Аналогичным образом, результаты работы Мащука и др. [30] дополнительно подтверждают надежность этого метода, характеризуя механические свойства армированного сталью раствора для усиления существующих каменных и бетонных конструкций.

Серьезное внимание исследователей было сосредоточено на применении методов неразрушающего контроля на основе применения электромагнитных колебаний для оценки бетонных конструкций. Например, Солла и др. [31], Ломбарди и др. [32] и Мартини и др. [33] подчеркнули эффективность использования георадара (англ. Ground Penetrating Radar – GPR) для определения характеристик каменной кладки и сбора информации о ее механических свойствах. Алани и др. в [34] обсуждают использование георадара в двух тематических исследованиях. Например, мост Форт-Роуд в Шотландии, который заподозрен в конструктивных дефектах, таких как трещины в арматуре и проникновение влаги на покрытие моста. Один из английских автодорожных мостов был исследован на наличие дефектов, таких как структурные трещины, в конструкции настила, которые влияют на поведение верхней и нижней арматуры, расположенной поперек моста. Бебен и др. [35] подтвердили его надежность, исследуя железобетонную балку виадука в части определения геометрических характеристик балок, расстояния между арматурными стержнями и глубины их расположения.

Распространение волн или отражение рентгеновских лучей через бетонные или каменные конструкции могут быть использованы для диагностики структурных повреждений, полученных в результате пожара. Многие исследования состояния бетонных конструкций и каменной кладки, в которых для оценки состояния конструкций использовалась рентгенография, позволили подтвердить эффективность применения подобных методов. Так, работа Камаль и Булфиза [36] продемонстрировала эффективность рентгеновского картирования изображений с обратным рассеянием электронов (BEI) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), при этом было установлено, показан полимер, армированный стекловолокном, когда арматура из стекловолокна пропускает воду, одновременно блокируя попадание щелочей.

Чжан и его соавторы в [37] используют передовую неразрушающую технологию, называемую нейтронной рентгенографией, для визуализации диффузии, влаги в бетоне и других композитах на основе цемента, а также для измерения распределения влажности в зависимости от времени. Де Бир и др. [38] подтвердили надежность результатов

нейтронной рентгенографии для получения количественных данных о пористости и сорбционной способности бетона в лабораторных или обычных измерениях, в то время как Пей и др. [39] провели экспериментальное моделирование для использования высокоэнергетической рентгеновской системы на месте для улучшения изображения за счет уменьшения шумовых характеристик для проверки состояния железобетонных конструкций после пожара. Кроме того, Мовафеги и др. в [40] показали, что интегрированная рентгенография является доступным методом минимизации затрат для осмотра и мониторинга бетонных конструкций за счет улучшения визуализации арматурных стержней, фитингов или натяжных тросов и дефектов бетона.

На протяжении многих лет в многочисленных исследованиях применялся ультразвуковой контроль для исследования состояния бетонных и каменных конструкций путем измерения продолжительности прохождения продольных волн на заданном расстоянии. Например, в работах Богас и др. [41] и Мата и др. [13] подчеркнута эффективность ультразвукового импульсного контроля скорости при оценке прочности бетона на сжатие. Янг и др. [14] дополнительно подтверждают надежность этого метода в различных сценариях послеаварийного исследования.

Хуан и др. [42] исследовали и подмечают преимущества сочетания нескольких методов неразрушающего контроля, такие как UPV (управление просмотром базы данных) в сочетании с испытанием по методу Шмидта, которые позволяют повысить точность оценки прочности при сжатии. Кроме того, Кевалрамани и др. и Тртник с соавторами интегрировали методы UPV с искусственными нейронными сетями для повышения точности прогнозирования прочности бетона на сжатие.

Кржеминь и др. [43] установили взаимосвязь между эхо-сигналами от удара и бетоном, подвергнутым воздействию высокой температуры, для изучения механических свойств бетона после пожара. Аналогичным образом, Epasto и др. [44] исследовали разрушение бетона, временную локализацию и энергетический состав гармонических составляющих в поврежденном огнем бетоне, используя методы эхо-сигнала от удара и вейвлет-частотно-временной методологии. Качановым и др. [45] исследованы компактные бетонные строительные конструкции с использованием метода мультипликативного эхо-воздействия для определения прочности бетона во время эксплуатации строительных конструкций. Наконец, исследованием Чжана и соавт. [37] был отмечен прогресс в интеграции методов эхо-анализа с передовыми методами машинного обучения для выполнения комплексного анализа и распознавания образов сигналов для полной оценки состояния (т.е. обнаружения дефектов, диагностики дефектов, определения размеров и местоположения дефектов, как следствия воздействия продуктов горения).

За прошедшее время было проведено множество исследований, посвященных применению оптического неразрушающего контроля (NDT), методов оценки бетонных и каменных конструкций. Янг и др. [46] продемонстрировали полезность технологии 3D-лазерного сканирования при создании и калибровке конечно-элементной модели для оценки состояния бетонных конструкций. Лоу и др. [47] и Олсен с соавторами [48] использовали наземное лазерное сканирование для оценки структуры бетона. В то время как другие исследования фокусируются на визуальном контроле, например, Stewart et al. [49] исследовали возможности визуального контроля, чтобы подтвердить его надежность для оценки безопасности поврежденных в ходе пожара железобетонных конструкций.

Заключение

Исследование содержания актуальных литературных источников позволило выявить из числа достаточно апробированных наиболее перспективные методы неразрушающего контроля состояния строительных конструкций после пожара:

– интегрирование методов визуального контроля с роботизированными системами, поддерживающими машинное обучение, для автоматизации визуального контроля, что

важно как для контроля состояния строительных конструкций, так и для их последующего восстановления;

– многие исследователи подтвердили эффективность использования инфракрасной термографии, которая является еще одним оптическим неразрушающим методом, использующим спектральный анализ для оценки ухудшения состояния бетонных конструкций после пожара;

– для оценки скрытых дефектов на различных глубинах и в локальных областях конструкции возможно нагревание подозреваемой области лампами с последующим спектральным анализом дефекта с использованием акустических сигналов.

Несколько подходов неразрушающего контроля предполагают использование электрических характеристик материала конструкции для оценки их состояния:

– измерения электрического сопротивления для параметров обнаружения и локализации трещин и сколов в бетоне;

– измерения электрического сопротивления для оценки количественной оценки ориентации волокон в стальном фибробетоне (SFRC);

– учет корреляции между прочностными свойствами бетона и поверхностным электрическим сопротивлением на основе технологии UPV.

Содержание международных стандартов, норм и руководств, а также критерии оценки неразрушающего контроля для бетонных конструкций могут быть темой отдельного изучения проблемы выбора методов неразрушающего контроля бетонных конструкций, подвергающихся воздействию продуктов горения в ходе пожара.

Список источников

1. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM international, 2014.
2. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review / M. Gupta [et al.] // *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022. № 8 (2). P. 2286–2307.
3. Development of prediction models for mechanical properties and durability of concrete using combined nondestructive tests / K. Amini [et al.] // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019. № 31 (2). P. 04018378.
4. Assessment of concrete strength using the combination of NDT – Review and Performance Analysis / B. Kouddane [et al.] // *Applied Sciences*. 2022. № 12 (23). P. 12190.
5. Assessment of concrete strength combining direct and NDT measures via Bayesian inference / R. Giannini [et al.] // *Engineering structures*. 2014. № 64. P. 68–77.
6. Prassianakis I., Giokas P. Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods // *Magazine of Concrete Research*. 2003. № 55 (2). P. 171–176.
7. Rajabi A.M., Omid Moaf F., Abdelgader H.S. Evaluation of mechanical properties of two-stage concrete and conventional concrete using nondestructive tests // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. № 32 (7). P. 04020185. Review and performance analysis. *Applied Sciences*. 2022. № 12 (23). P. 12190.
8. Aghaee K., Yazdi M.A., Tsavdaridis K.D. Investigation into the mechanical properties of structural lightweight concrete reinforced with waste steel wires // *Magazine of Concrete research*. 2015. № 67 (4). P. 197–205.
9. Esteves I.C., Medeiros-Junior R.A., Medeiros M.H. NDT for bridges durability assessment on urban-industrial environment in Brazil // *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2018. № 36 (5). P. 500–515.
10. Hoła J., Bień J., Schabowicz K. Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2015. № 63 (1). P. 87–96.
11. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography / H. Glavaš [et al.] // *Buildings*. 2019. № 9 (2). P. 32.

12. Forde M.C. International practice using NDE for the inspection of concrete and masonry arch bridges // *Bridge Structures*. 2010. № 6 (1, 2). P. 25–34.
13. Mata R., Ruiz R.O., Nuñez E. Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method // *Construction and Building Materials*. 2023. № 369. P. 130569.
14. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity / H. Yang [et al.] // *Fire safety journal*. 2009. № 44 (1). P. 121–130.
15. Bonagura M., Nobile L. Artificial neural network (ANN) approach for predicting concrete compressive strength by SonReb. *Struct. Durab // Health Monit*. 2021. № 15. P. 125–137.
16. Breccolotti M., Bonfigli M.F. I-SonReb: an improved NDT method to evaluate the in situ strength of carbonated concrete // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2015. № 30 (4). P. 327–346.
17. Measurement of accelerated steel corrosion in concrete using ground-penetrating radar and a modified half-cell potential method / W.L. Lai [et al.] // *Journal of Infrastructure Systems*. 2013. № 19 (2). P. 205–220.
18. Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half cell potential techniques / J. Rhazi [et al.] // *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. 2003.
19. Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests / M. Shariati [et al.] // *Scientific research and essays*. 2011. № 6 (1). P. 213–220.
20. Sanchez K., Tarranza N. Reliability of rebound hammer test in concrete compressive strength estimation // *Int. J. Adv. Agric. Environ. Eng*. 2014. № 1 (2). P. 198–202.
21. Kazemi M., Madandoust R., De Brito J. Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing // *Construction and Building Materials*. 2019. № 224. P. 630–638.
22. Compressive strength of solid clay brickwork of masonry bridges: Estimate through Schmidt Hammer tests / A. Brencich [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. № 306. P. 124494.
23. Balla B., Orbán Z., Len A. Assessing the reliability of single and combined diagnostic tools for testing the mechanical properties of historic masonry structures // *Pollack Periodica*. 2019. № 14 (3). P. 31–42.
24. Breccolotti M., Bonfigli M.F. I-SonReb: an improved NDT method to evaluate the in situ strength of carbonated concrete // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2015. № 30 (4). P. 327–346.
25. Pull-off testing as an interfacial bond strength assessment of CFRP-concrete interface exposed to a marine environment / H. Fazli [et al.] // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018. № 84. P. 335–342.
26. Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength / N. Ramos [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2012. № 31. P. 86–93.
27. Bonaldo E., Barros J.A., Lourenço P.B. Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing // *International journal of adhesion and adhesives*. 2005. № 25 (6). P. 463–474.
28. Non-destructive identification of pull-off adhesion between concrete layers / Ł. Sadowski // *Automation in Construction*. 2015. № 57. P. 146–155.
29. Mechanical characterization of steelreinforced grout for strengthening of existing masonry and concrete structures / S. Mazzuca [et al.] // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019. № 31 (5). P. 04019037.
30. Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools / M. Solla [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2012. № 29. P. 458–465.

31. Lombardi F., Lualdi M., Garavaglia E. Masonry texture reconstruction for building seismic assessment: Practical evaluation and potentials of Ground Penetrating Radar methodology // *Construction and Building Materials*. 2021. № 299. P. 124189.
32. Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests / R. Martini [et al.] // *Procedia Structural Integrity*. 2017. № 5. P. 1108–1115.
33. Alani A.M., Aboutalebi M., Kilic G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment // *Journal of applied geophysics*. 2013. № 97. P. 45–54.
34. Beben D., Mordak A., Anigacz W. Ground penetrating radar application to testing of reinforced concrete beams // *Procedia Engineering*. 2013. № 65. P. 242–247.
35. Kamal A., Boulfiza M. Durability of GFRP rebars in simulated concrete solutions under accelerated aging conditions // *Journal of Composites for Construction*. 2011. № 15 (4). P. 473–481.
36. Neutron radiography, a powerful method to determine time-dependent moisture distributions in concrete / P. Zhang [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241 (12). P. 4758–4766.
37. De Beer F.C., Le Roux J.J., Kearsley E.P. Testing the durability of concrete with neutron radiography // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. № 542 (1-3). P. 226–231.
38. Pei C., Wu W., Ueaska M. Image enhancement for on-site X-ray nondestructive inspection of reinforced concrete structures // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2016. № 24 (6). P. 797–805.
39. Inspection and monitoring of concrete structures via radiography and weighted nuclear norm minimization method / A. Movafeghi [et al.] // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. № 56. P. 361–368.
40. Bogas J.A., Gomes M.G., Gomes A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity method // *Ultrasonics*. 2013. № 53 (5). P. 962–972.
41. Huang Q., Gardoni P., Hurlbaush S. Predicting Concrete Compressive Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity and Rebound Number // *ACI Materials Journal*. 2011. № 108 (4).
42. Krzemień K., Hager I. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method // *Construction and Building Materials*. 2015. № 96. P. 155–163.
43. Epasto G., Proverbio E., Venturi V. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method // *Materials and structures*. 2010. № 43. P. 235–245.
44. Measuring the Acoustic Characteristics of Compact Concrete Building Structures Using the Impact Echo Method / V. Kachanov [et al.] // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. № 58 (1). P. 1–9.
45. Yang H., Xu X., Neumann I. The benefit of 3D laser scanning technology in the generation and calibration of FEM models for health assessment of concrete structures // *Sensors*. 2014. № 14 (11). P. 21889–21904.
46. Law D.W., Silcock D., Holden L. Terrestrial laser scanner assessment of deteriorating concrete structures // *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. № 25 (5). P. e2156.
47. Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment / M.J. Olsen [et al.] // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2010. № 24 (3). P. 26–27.
48. Stewart M.G. Reliability safety assessment of corroding reinforced concrete structures based on visual inspection information // *ACI Structural Journal*. 2010. № 107 (6). P. 671.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 12.09.2025; принята к публикации: 19.09.2025

Информация об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Пермяков Алексей Александрович, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: ftoorb@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN-код: 5444-3350

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313